

（原子力委員会国際問題懇談会資料 平成18年6月23日）

インドの原子力研究・開発・利用の現状

（株）原子力安全システム研究所
技術システム研究所長 木村 逸郎

1. はじめに

インドでは、1947年の建国早々から原子力の重要性が認識され、ネルー首相の支援でバーバ博士を中心に研究開発がスタートし、翌年には原子力委員会が発足した。また54年には原子力省も設置された。

膨大な人口を抱えるインドは、化石燃料が不十分な上にそれが東部にしかなく、水力も北部に偏在している。こうしたことからエネルギー源としての原子力の意義は大きい。40万トン近いトリウム資源があるのに対し、ウランはその数分の1しかないため、バーバ博士は独自の開発計画を立てた。まず第1段階として、天然ウラン重水炉で発電し、燃料再処理によりプルトニウムを生産する。次の第2段階ではこれを燃やして増殖し、途中から重水炉や高速炉へトリウムを装荷してウラン233の生産を始め、第3段階では最終的にトリウムサイクルを確立するというものである。全体的にはまだ第1段階であるが、すでに、高速炉の運転を始め、重水炉へのトリウム装荷を試みているので、一部は第2段階に入ったともいえる。しかし近年の電力需要の急上昇に応えるため、この計画から外れて、ロシア型加圧水型原子炉（VVER）2基の建設を開始した。

インドの原子力行政および事業の組織を図1と図2に示す。現業的な事業は徐々に国営から準民営に移行しつつある。また主要な原子力機関と施設の地図を図3に示す。

2. 核実験による国際関係の変化

当初は、英国、カナダ、米国、フランスなどの協力を得て研究開発を開始した。原子力発電にも早くから着手し、最初に米国製の沸騰水型原子炉（BWR）2基をタラプールに建設、1969年から運転を開始した。次に、カナダからカナダ型重水炉（CANDU）を輸入してラジャスタンに建設し、73年から1号機の運転に入った。しかし、74年5月核爆発実験を実施したことが国際的に大きな問題となり、カナダがそれ以後協力と支援から手を引いたため、2号機建設は大幅に遅れ、81年にやっと運転を開始した。また米国もタラプール1, 2号機の燃料供給を打ち切ったので、フランス、中国、ロシアからその燃料用濃縮ウランを購入した。その後もインドは、核拡散防止条約（NPT）および包括的核実験禁止条約（CTBT）に加盟していない。そのため国際協力を得にくい状況下にあるが、それがかえって原子力開発の自主性を高めたとも言え、核燃料サイクルのほとんど全てを自前で推進している。ただ国際原子力機関（IAEA）には加入し、有力メン

バーとして理事国の一つになっている。また、原子力発電会社は、世界原子力発電事業者協会（WANO）に参加している。

98年5月、インドは熱核融合を含む5回の核実験を突如実施し、世界に大きな衝撃を与え、多くの国の反発を招いた。更に隣国パキスタンの核実験まで導く結果となり、南アジアに緊張が高まり、欧米諸国の経済制裁を受けた。その後順次制裁は緩み、2006年3月米国のブッシュ大統領がインドを訪問したさい、米印原子力協力の合意が成立した。しかしその実現には米国議会の承認や国際的な手続きが必要である。

3．研究開発と教育

インドでは、表1に示す4基の研究炉が中性子ビーム実験、放射性同位元素（RI）生産等に使われている。アプサラはアジア最初の原子炉で、建設後50年になるが、今なお用いられている。また、46年目を迎えたサイラスは、照射した天然ウランからプルトニウムを抽出して最初の核実験に使ったことで注目された。その後、寿命延長の工事が完了したという。ドルーバは高出力のビーム炉だが、発電炉燃料の照射ループもある。一方、カミニは世界最初のウラン233燃料軽水減速BeO反射体の小型炉で、1997年に定格出力に到達し、後述の高速試験炉（FBTR）で照射した燃料ピンやロケット部品の中性子ラジオグラフィなどに使われている。表2には、臨界集合体も含んでいるが、新たに新型重水炉（AHWR）や高出力加圧重水炉（PHWR）の核特性試験用の臨界集合体が建設中である。一方中性子ビーム実験とRI生産能力を高めるために多目的研究炉を設計中である。

原子力研究の中心はバーバ原子力研究センター（BARC）だが、高速炉の研究開発はインディラ・ガンジー原子力研究センター（IGCAR）が担当している。原子力省の傘下には、これらの他に先端技術センター（CAT）があり、放射光施設Indus-1を開発・運転している。また同省はプラズマ研究所、タータ基礎研究所等も支援している。上述の研究炉はもちろん、発電炉でも放射性同位元素を生産している。それにより放射線の利用も盛んで、放射線育種、放射線滅菌、食品照射（香辛料350トン）、核医学診断等が活発に行われ、IAEAの地域活動（RCA計画）にも積極的に協力している。この他、原子力による海水脱塩も行っている。

BARCには立派な教育訓練センターがあり、毎年大学学部（各分野）卒の学生100 - 150名を集めて、厳しく指導している。インドの原子力界を支え得る人材の大半がここで養成されてきた。原子力委員長のA．カコドカール博士もここを主席で卒業している。最近、2、3の大学に原子核工学科が設置されたが、そのウエイトはまだ低く、大学には

1 基の研究炉もない。原子力の学会として、インド核学会（INS）がある。また、インド原子力産業会議（IAIF）も最近結成され、活動している。

4．原子力発電の開発と利用

現在運転中および建設中の原子力発電所は表 2 に示すように、最初の 2 基以降は国産の PHWR が続いている。そしてラジャスタン 2 号機以降はすべて国産である。昨年、高出力の PHWR 1 基（タラプール 4 号機）が商用運転に入ったので、後述の FBTR を除いて合計 15 基となり、電気出力は合計 331 万 kW である。現在研究開発と設計研究が進められている新型重水炉（AHWR）は、わが国の新型転換炉（ふげん）と見かけ上は似ているが、本格的にトリウム - ウラン 233 を利用する目的を持っている。

インドの原子力発電所は、当初は多くの事故や故障のため設備利用率は低かったが、最近は非常に高くなり、2002 - 2003 年は 90% に達した。しかし 2004 年はウラン燃料不足で 70% 弱まで低下した。2005 年も約 70% である。

現在建設中は高速炉を除いて 7 基あり、従来型の 4 基に加え、高出力の PHWR 1 基（タラプール 3 号機）の完成が近い。さらに 2002 年 3 月には VVER 2 基（クダンクラム 1・2 号機）の建設が開始された。建設中のものが全て加わると全電気出力は 673 万 kW となる。2020 年には 2000 万 kW にするという目標があるが、さらにその倍の 4000 万 kW という話も出ている。

ウランは主に東インドのジャーカンド州の 3 鉱山で採鉱されているが、生産が不足気味で、輸入の可能性を探っている。一方トリウムは南インド西側のケララ州で多く産出する。2 基の BWR と 13 基の PHWR にそれぞれ用いる低濃縮と天然ウラン燃料は、すべてハイデラバードにある核燃料コンプレックスで製造されている。一方プルトニウムとトリウム燃料は BARC が扱っている。重水の生産も順調で、その一部は韓国や中国へ輸出された。使用済燃料の再処理は BARC 近傍の施設で始められ、プルトニウムとウラン 233 の抽出に成功している。次いで本格的な第 2 と第 3 再処理プラントをタラプールとカルパッカムに建設した。

フランスの協力を得て建設した FBTR は、世界で初の混合炭化物燃料を採用した。燃料の都合で小型炉心としているため定格より低い熱出力（15 MWt）で運転し、低出力ながら発電もしている。2005 年には臨界から 20 周年を迎え、最高燃焼度 15.4 万 MWd / t に到達した。写真 1 にその全景を示す。また、50 万 kW_e の高速原型炉（PFBR）の建設が開始された。その燃料には混合酸化物（MOX）を採用する予定で、目下その燃料が FBTR で照射試験中である。さらにトリウム系燃料の小形高温炉や加速器

駆動未臨界炉の研究開発も始まった。

2004年12月26日、スマトラ島沖地震に起因する津波がインド南部東海岸を襲い、いくつかの原子力施設に影響があったが、そのすべては早急に復旧した。

5．おわりに

以上簡単に述べたように、インドは、当面は天然ウランを利用し、将来はトリウムサイクルの確立を目指して、着実に原子力の研究・開発と利用の道を進めてきている。2度（合計6回）の核実験によって国際協力を得にくい状況下でありながら、自主開発に力を注ぎ核燃料サイクルのほとんど全てを国産化してきた。これは主として国を挙げての推進によるが、原子力に優れた人材を集中してきたことにもよると言えよう。さらに21世紀に入り、国の発展と国民生活の向上に伴い、エネルギー需要は著しく伸び、原子力への期待が高まっているようであり、既定路線を着々とやっけては需要に応えきれないということで、VVER 2基の建設にも着手した。2020年の目標を2000万kWから倍増して4000万kWに置き換えようという動きもある。しかしこのためには原子炉と燃料の輸入が不可欠であり、順次IAEAの保障措置受け入れも進むことであろう。

わが国とインドは従来から友好的な関係にあるが、こと原子力に関しては、NPTに加盟せず、核実験を強行した不届きな国として位置付けられ、断交状態に近かった。その状態におけるわずかな窓として、筆者の知るところは次の3カ所である。（1）文部省（のち文部科学省）、主に日本学術振興会による交流*、（2）IAEAを通じた関係、例えば原子力安全、高速炉技術など、（3）WANOによる活動、例えば同東京センターにはインド代表も駐在、またインドの原子力発電所のピア・レビュー参加など。

今後米国とインド間の原子力協定が日の目を見るようになったとして、わが国としていかにあるべきか、本稿の範囲を越えるのであまり述べないが、原子炉の安全確保と放射線の利用などを中心に、もう少し協力関係を深めてもいいのではないかと考えている。

参考文献

- （1）Government of India, Department of Atomic Energy, "Atomic Energy in India: A Perspective", (2005).（資料配布）
- （2）Government of India, Department of Atomic Energy, Milestone : 2005-2006, Nucl, India, 39(9-10)(2006).
- （3）インド原子力省ホームページ, <http://www.dae.gov.in/>.
- （4）G. Lohnert (Guest Editor) and so forth, "Topical Issue on India's Reactors", Nucl. Eng. Design, 236(7-8)(2006).

* 筆者はこれにより日印の研究者交流を推進し、トリウム利用日印セミナーを開催した。

筆者の最近の資料

- (1) 木村逸郎、「原子力年鑑 2006」、各国の原子力動向の「インド」の項、pp.178-182(2005)。(1994 年から執筆)。
- (2) 木村逸郎、「FBR 実用化に向けスタート」の中、「インドの開発事情、トリウムサイクル確立へ」、エネルギーレビュー、2006-4、pp.21-22(2006)。(資料配布)

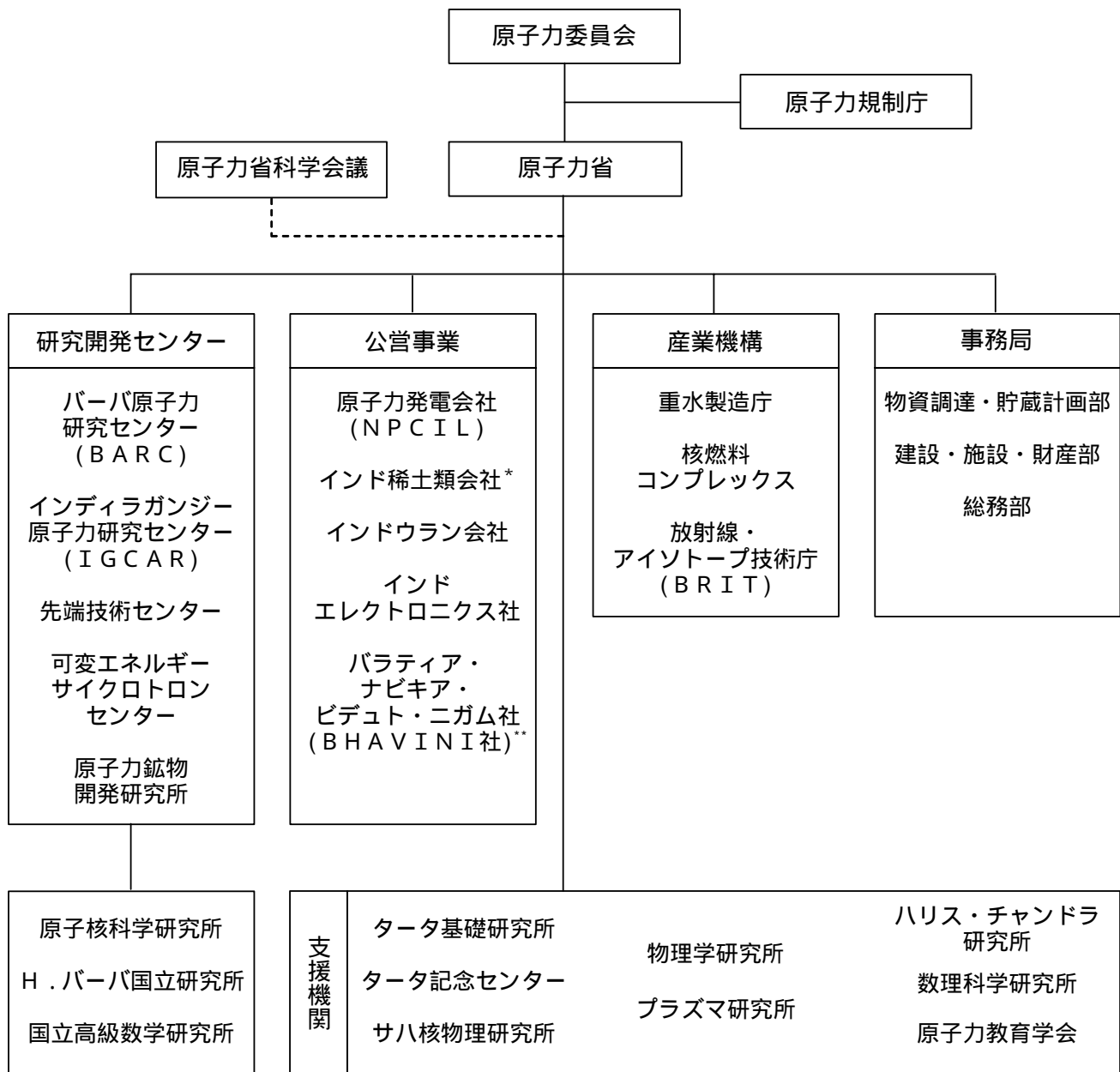


図 1 原子力行政と事業の組織（原子力規制庁の中は図 2 参照）

* トリウム燃料はインド稀土類会社が生産

** BHVINI 社は高速原型炉（PFBR）建設担当

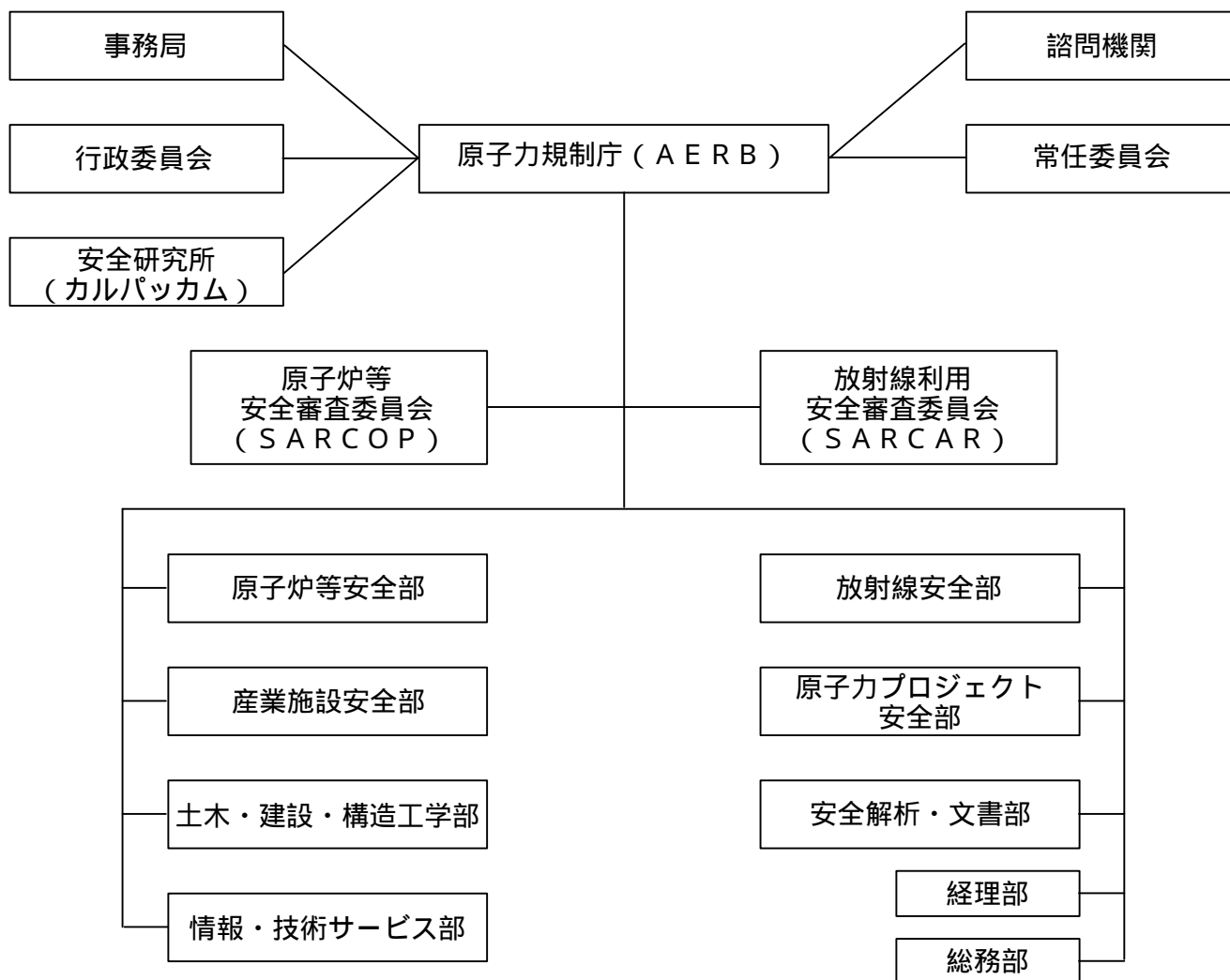


図 2 原子力規制庁 (Atomic Energy Regulatory Board (AGRB)) の組織



図3 インドの主要な原子力機関と施設の地図 (右はその内容 (アルファベット順))

表 1 インドの試験研究用原子炉（臨界集合体を含む。高速試験炉は原子力発電所へ）

名 称	所在	型 式	熱 出 力	初臨界その他特 記事項
アプサラ (Apsara)	BARC	高濃縮ウラン燃料、軽水減速冷却、プール型	1MW (通常 400kW)	1956 年臨界、アジアで最初の原子炉
サイラス (Cirus)	同上	天然ウラン燃料、重水減速、軽水冷却、タンク型 (NRX 型)	40MW	1960 年臨界、基礎研究、RI 生産、燃料照射
ゼルリナ (Zerlina)	同上	天然ウラン燃料、重水減速、臨界実験装置	低出力 (100W 以下)	1961 年臨界、1983 年廃炉
プルニマ 1 (Purnima- 1)	同上	酸化プルトニウム燃料、高速炉臨界実験	低出力	1972 年臨界、高速パルス炉開発用
プルニマ 2 (Purnima- 2)	同上	硝酸ウラニル(ウラン 233) 水溶液冷却、タンク型	低出力	1984 年臨界、カミニ用臨界実験
ドルーバ (Dhruva)	同上	天然ウラン（金属）燃料、重水減速冷却、タンク型	100MW	1985 年臨界、各種実験設備保有
プルニマ 3 (Purnima- 3)	同上	ウラン 233 アルミ合金板燃料、軽水減速、BeO 反射体臨界実験	低出力	カミニ用臨界実験
カミニ (Kamini)	IGCAR	上と同じ燃料と減速材 Slowpoke 型小型炉	30kW	1996 年臨界、世界で唯一のウラン 233 燃料
新型重水炉 高出力 加圧重水炉 臨界装置	BARC	ウラン 233・トリウム（一部プルトニウム）燃料、重水減速、軽水冷却炉などの臨界実験	低出力	建設中
多目的研究炉 (MPRR)	同上	中濃縮ウラン燃料、軽水冷却重水反射体付、タンク型	20MW	設計中

表2 インドの原子力発電所（高速試験炉を含む）

名 称	略 称	型 式	電 気 出 力 (万 kW)	運転開始年または その予定(年)	原子炉 製造者
タラプール 1	TAPS-1	BWR	16	1969	米国 GE 社
同上 2	TAPS-2	BWR	16	1969	同上
同上 3	TAPS-3	PHWR	54	(2007)	インド国産
同上 4	TAPS-4	PHWR	54	2005	同上
ラジャスタン 1	RAPS-1	CANDU	10	1973	カナダ GE 社
同上 2	RAPS-2	CANDU	20	1981	インド国産
同上 3	RAPS-3	PHWR	22	2000	同上
同上 4	RAPS-4	PHWR	22	2000	同上
同上 5	RAPS-5	PHWR	22	(2007)	同上
同上 6	RAPS-6	PHWR	22	(2008)	同上
マドラス 1	MAPS-1	PHWR	17	1984	同上
同上 2	MAPS-2	PHWR	22	1986	同上
ナローラ 1	NAPS-1	PHWR	22	1991	同上
同上 2	NAPS-2	PHWR	22	1992	同上
カクラパー 1	KAPS-1	PHWR	22	1993	同上
同上 2	KAPS-2	PHWR	22	1995	同上
カイガ 1	KAIGA-1	PHWR	22	2000	同上
同上 2	KAIGA-2	PHWR	22	2000	同上
同上 3	KAIGA-3	PHWR	22	(2007)	同上
同上 4	KAIGA-4	PHWR	22	(2007)	同上
クダंकラム 1	KK-1	VVER	100	(2007)	ロシア原子力輸出社
同上 2	KK-2	VVER	100	(2008)	同上
高速試験炉	FBTR	混合炭化物燃料、 ナトリウム冷却、 ループ型	0.2	1985	インド国産
高速原型炉	PFBR	混合酸化物燃料、 ナトリウム冷却、 プール型	50	建設中 (2011)	同上
新型重水炉	AHWR	ウラン 233・トリ ウム（一部プルト ニウム）燃料、重 水減速、軽水冷却	30	設計中	同上
高出力加圧 重水炉	PHWR	従来の PHWR の出 力増強	70	設計中	同上



写真 1 高速試験炉（FBTR）の全景（後方に第3再処理プラント）